

积分实验系统的标准样品法检验

张 凯¹ 聂阳波¹ 鲍 杰¹ 阮锡超¹ 任 杰¹
韩 瑞² 黄翰雄¹ 李 霞¹ 周祖英¹

1 (中国原子能科学研究院 核数据重点实验室 北京 102413)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 积分实验是检验评价中子核数据准确性的重要手段,利用标准样品法,对中国原子能科学研究院的积分实验系统进行了检验。标准样品分别采用聚乙烯(10 cm×10 cm×5 cm)和水(∅10 cm×5 cm),通过中子飞行时间技术,获得了 14 MeV 氘氚脉冲中子与聚乙烯作用后 47°方向泄漏中子谱,与水作用后 30°方向泄漏中子谱。利用 MCNP5 程序获得相应的模拟,对模拟谱(C)与实验谱(E)中的中子与氢弹性散射峰(n-p 散射峰)面积进行了比较。结果表明,两个样品的 n-p 散射峰面积 C/E 值均在 2%内一致。实验证明系统获得的测量数据是可靠的。

关键词 积分实验,标准样品法,飞行时间技术,n-p 散射,C/E 值

中图分类号 TL816⁺.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.080501

评价中子核数据是核装置设计中的基础数据,如反应堆,为了确保评价数据的准确性,国际上通常通过积分实验来对评价数据进行检验^[1-3],一个可靠的积分实验系统成为开展评价数据检验的重要前提。由于中子和氢(H)只有弹性散射一个反应道,国际上也通常将这个反应道截面作为一个标准截面使用^[4-5],因此,通过测量含氢物质(标准样品)的泄漏中子谱成为检验积分实验系统的主要手段,常用的标准样品主要是聚乙烯和水。

中国原子能科学研究院目前已经建立了一套用于评价核数据检验的积分实验系统,为了验证该系统测量数据的可靠性,通过测量聚乙烯和水样品的泄漏中子谱来对系统进行检验。检验结果证明积分实验系统可靠,该系统可成为开展评价中子核数据检验工作的实验平台。

1 测量角度选择

该研究主要利用中子与氢(n-p)散射峰面积来检验系统,因此,获得一个干净的 n-p 散射中子峰是非常重要的。由于氢气的密度很小,单位体积的氢原子很少,利用氢气作为标准样品很难达到统计要求。聚乙烯和水是最常见的含氢比重高的材料,但在实验测量中,中子与聚乙烯中的碳(C)或与水中的氧(O)作用后,总有些反应道的出射中子能量近似等于 n-p 散射中子能量。由于 n-p 散射出射中子能量

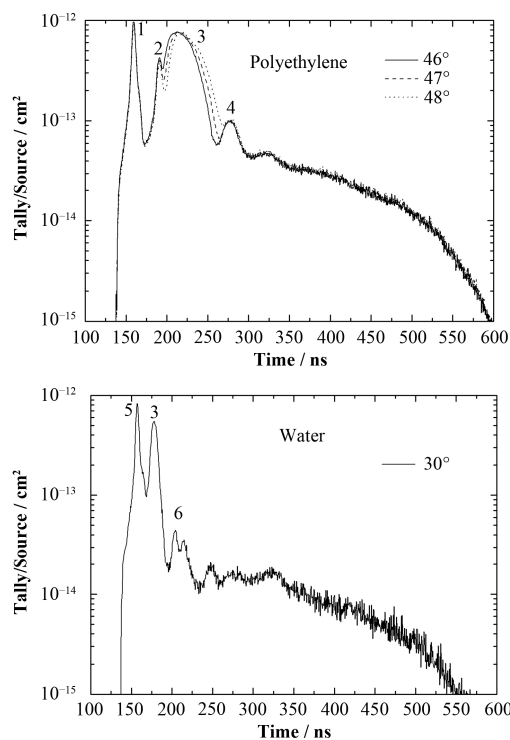


图1 标准样品泄漏中子飞行时间谱模拟结果

1: 中子与 C(n-C)弹性散射峰, 2: (n-C)第一非弹, 3: n-p 散射峰, 4: (n-C)第三非弹, 5: 中子与氧(n-O)弹性散射峰, 6: (n-O)非弹散射峰

Fig.1 Simulation results of the neutron leakage spectrum for the standard samples.

1: n-C elastic scattering peak, 2: n-C first inelastic scattering peak, 3: n-p elastic scattering peak, 4: n-C third inelastic scattering peak, 5: n-O elastic scattering peak, 6: n-O inelastic scattering peak

第一作者: 张凯, 男, 1988 年出生, 2011 年毕业于兰州大学, 现为中国原子能院硕士研究生, 粒子物理与原子核物理专业

通讯作者: 聂阳波, E-mail: nieyb@ciae.ac.cn

收稿日期: 2014-03-20, 修回日期: 2014-04-17

随角度变化非常灵敏,选择合适的测量角度可以尽量减少其他反应道出射中子对 n-p 散射峰的干扰。

为了确定最佳测量角度,利用 MCNP5 程序分别模拟了聚乙烯和水不同角度的出射中子谱,典型模拟结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,对聚乙烯在 47°方向, n-p 散射中子正好位于 n-C 第一非弹性散射峰与第三非弹性散射峰之间;对水样品在 30°方向, n-p 散射中子正好位于 n-O 弹性散射峰与第一非弹性散射峰之间。因此,选择测量了聚乙烯样品(10 cm×10 cm×5 cm)在 47°方向泄漏中子谱,水样品(∅10 cm×5 cm)在 30°方向泄漏中子谱。

2 积分实验系统介绍

实验在中国原子能科学研究院 600 kV 高压倍

加器上进行,具体实验布局如图 2 所示。

中子通过 $T(d,n)^4\text{He}$ 反应产生,其中入射氦束 $E_d=300\text{ keV}$,氦靶厚度约 $1\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,束流平均流强约 $30\text{ }\mu\text{A}$,脉冲频率为 1.5 MHz ,脉宽约为 2.5 ns (Full Width Half Maximum, FWHM),束斑大小约 $\phi 5\text{ mm}$ 。 $T(d,n)^4\text{He}$ 反应每产生一个中子,同时也会在质心系中的相反方向有一个 α 粒子出射,利用金硅面垒探测器测量某一方向产生的 α 粒子可以间接推出产生的总中子数。将主探测器置于高压倍加器大厅 2 m 厚的墙体之外,墙体可有效地降低实验大厅漫散射的中子成分对测量的影响。为更好地降低散射中子本底和直接来自中子源的影响,在样品和墙体准直器之间增加了一套前级准直系统。

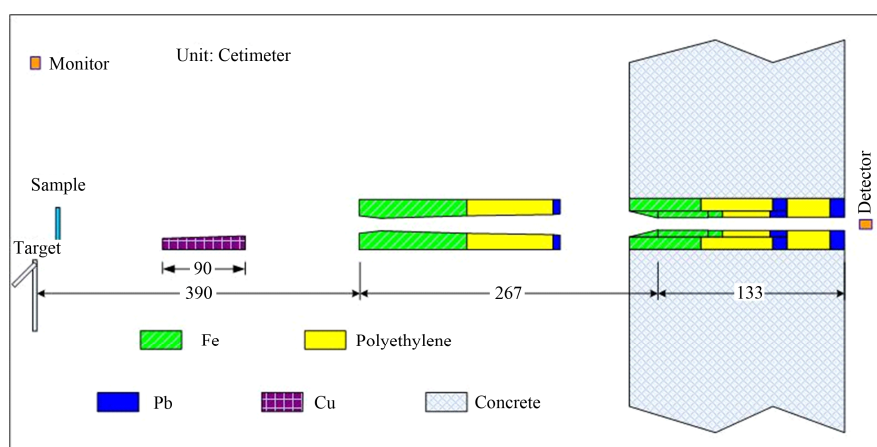


图 2 标准样品法检验积分实验系统实验布局图

Fig.2 Experimental arrangement for inspecting the integral experimental system by the standard sample method.

图 3 为实验测量的聚乙烯样品的效应谱和本底谱,本底谱所占份额很低。主探测器使用 BC501A 型液闪探测器($\phi 5.08\text{ cm}\times 2.54\text{ cm}$),通过飞行时间方法测量样品在不同角度的泄漏中子时间到达谱。在与 D 束成 0°的方向放有一个与主探测器相同大小的液闪探测器,用来监视加速器的脉冲束形状。

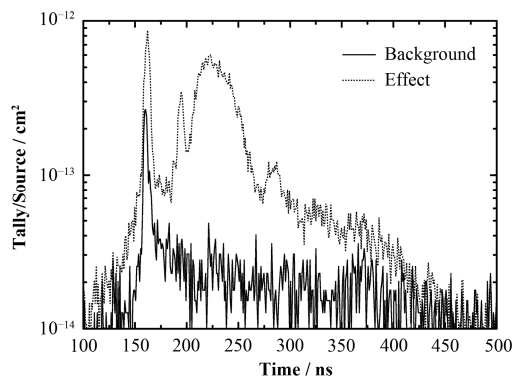


图 3 聚乙烯样品的效应谱和本底谱

Fig.3 Background spectrum and effect spectrum for the polyethylene sample.

3 归一系数计算

MCNP5 模拟得到的是单位源中子被探测器探测到的几率,而实验测量得到的是探测器上中子的个数。因此,在计算数据和实验数据比较之前要将实验数据归一至单位源中子上,归一系数可通过伴随测量管道(图 4)的尺寸以及 D-T 源中子的各向异性因子计算得到^[6-7],135°伴随离子测量管道的结构如图 4 所示,计算公式如下:

$$\phi_n(\theta, \bar{E}_d) = \frac{N_a}{\Delta\Omega_a} A_a \quad (1)$$

$$\Delta\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2} \quad (2)$$

$$A_{\alpha} = \frac{\left(\frac{dw}{dw'}\right)_{\alpha}}{\left(\frac{dw}{dw'}\right)_{\text{n}}} \quad (3)$$

$$\frac{\varphi_{\text{n}}(\theta, \bar{E}_{\text{d}})}{Y} = \frac{\sigma(\theta)}{\sigma_{\text{tot}}} \quad (4)$$

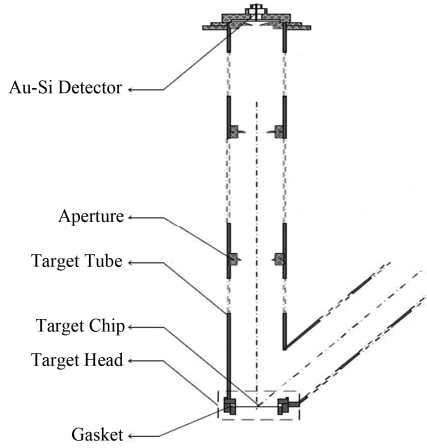


图4 伴随粒子靶管示意图
Fig.4 Schematic diagram of associated particle target tube.

式中, $\varphi_{\text{n}}(\theta, \bar{E}_{\text{d}})$ 是氘束成 θ 角方向位立体角内的中子通量; $\bar{E}_{\text{d}}$ 为平均入射氘束能量(约 150 keV); $\Delta\Omega_{\alpha}$ 表示 α 探测器对靶所张的立体角; r 为限制光栏半径(0.16 cm); R 为限制光栏到靶中心的距离(90 cm); N_{α} 表示 α 探测器计数; $[(dw)/(dw')]_{\alpha}$ 和 $[(dw)/(dw')]_{\text{n}}$ 可由文献[7]得到; A_{α} 为各向异性因子($\theta=0^{\circ}$ 、 $\varphi=135^{\circ}$ 时各向异性因子为 1.263); Y 为子产

额; $\sigma(\theta)$ 为 θ 角微分截面($\theta=0^{\circ}$ 时, $\sigma=0.336 \text{ b}\cdot\text{sr}^{-1}$); σ_{tot} 表示总截面($\bar{E}_{\text{d}}=150 \text{ keV}$ 时, $\sigma_{\text{tot}}=3.984 \text{ b}$)。由式(1)–(4)及以上数据可得:

$$\frac{Y}{N_{\alpha}} = \frac{A_{\alpha} R^2 \sigma_{\text{tot}}}{\pi r^2 \sigma(\theta)} = 1.508 \times 10^6 \quad (5)$$

即每测量一个 α 粒子表示靶头产生 1.508×10^6 个中子。考虑到靶点漂移和微分截面等引起的误差, 该系数总的不确定度约 3%。

4 系统检验结果

利用伴随粒子计数以及式(5)给出的归一系数完成标准样品实验谱的归一; 用 MCNP5 程序模拟得到相应的模拟谱(采用 ENDF/V-II 库数据), 模拟过程中细致考虑了源中子能谱角分布、探测器效率以及脉冲中子形状。结果如图 5 所示, 其中, 图 5(a)为阈值 0.5Cs (等效 239 keV 电子能量, 等效约 1.14 MeV 中子能量) 条件下聚乙烯样品的泄漏中子飞行时间谱, 图 5(b)为阈值 0.5Cs 条件下水样品的泄漏中子谱。计算了各自 n-p 散射峰面积, 并给出了模拟数据与实验数据之间的比值(C/E), 结果如表 1 所示。实验结果总不确定度均小于 6% (主要考虑统计误差、归一系数不确定度(约 3%)和探测器绝对效率不确定度(约 4%, 包括截面误差 2%、光响应函数引起的误差 3%以及探测器尺寸引入的误差 1%))。从结果可以看出, 标准样品的 C/E 值都很接近 1, 模拟结果与实验结果相差小于 2%。

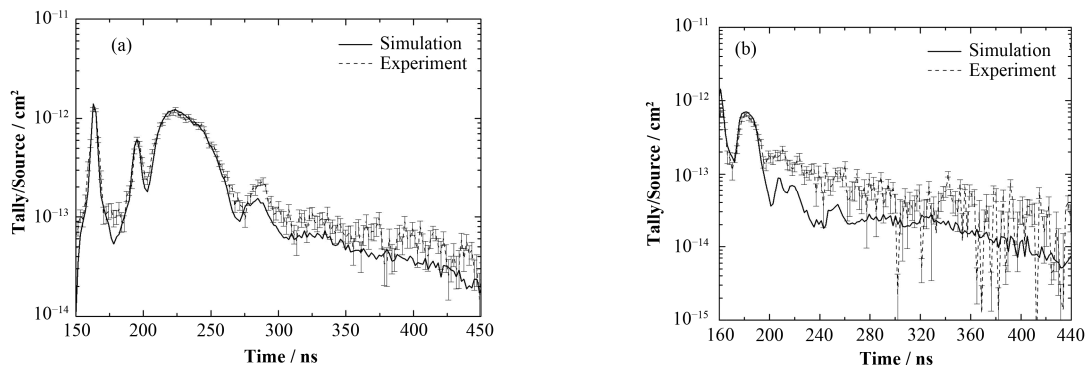


图5 聚乙烯样品(a)和水样品(b)的泄露中子谱
Fig.5 Neutron leakage spectrum for the polyethylene sample (a) and the water sample (b).

表 1 标准样品 n-p 散射峰面积比较
Table 1 Comparison of n-p scattering peak area for the standard samples.

样品 Sample	实验 Experiment	总(统计)误差 Total error	模拟 Simulation	模拟计算/试验 C/E
聚乙烯 Polyethylene	2.43×10^{-11}	5.07% (0.86%)	2.4×10^{-11}	0.986
水 Water	5.94×10^{-12}	5.39% (1.99%)	5.94×10^{-12}	0.992

5 结语

实验不仅充分证明了实验系统的可靠性,保证了该系统上开展的其他核素积分检验实验测量数据的准确性,且通过标准样品的 n-p 散射峰面积可以得到一个相对归一系数(实验谱 n-p 散射峰面积除以 α 粒子计数再除以模拟谱 n-p 散射峰面积),利用相对归一计数对实验谱进行归一可以直接抵消掉大部分系统误差。

参考文献

- 1 Yukio Oyama, Kazuaki Kosako, Hiroshi Maekawa. Measurement and calculations of angular neutron flux spectra from iron slabs bombarded with 14.8-MeV neutrons[J]. Nuclear Science and Engineering, 1993, **115**: 24–37
- 2 Freiesleben H, Hansen W, Richter D, *et al.* TUD experimental benchmarks of Fe nuclear data[J]. Fusion Engineering and Design, 1997, **37**: 31–37
- 3 Nie Y B, Bao J, Ruan X C, *et al.* Benchmarking of evaluated nuclear data for uranium by a 14.8-MeV neutron leakage spectra experiment with slab sample[J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, **37**: 1456–1460
- 4 沈冠仁, 黄糖籽, 温琛林, 等. 14.2 MeV 中子在 ^{238}U 上弹性散射角分布测量[J]. 原子核物理, 1984, **6**(3): 193–200
- 5 SHEN Guanren, HUANG Tangzi, WEN Shenlin, *et al.* Fast neutron elastic scattering differential cross section from ^{238}U [J]. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1984, **6**(3): 193–200
- 5 阮锡超, 黄翰雄, 蒋婧, 等. 8.17 MeV 中子与天然铁作用的次级中子双微分截面测量[J]. 原子能科学技术, 2009, **43**(9): 793–797
- 6 RUAN Xichao, HUANG Hanxiong, JIANG Jing, *et al.* Measurement of secondary neutron emission double-differential cross section for natural iron induced by 8.17-MeV neutron[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(9): 793–797
- 6 王大伦, 励义俊, 蒋励. 用伴随粒子法测量加速器聚变中子注量率[J]. 中国核科技报告, 1998, (00): 1–12
- 7 WANG Dalun, LI Yijun, JIANG Li. The measurement of the fluence rate of accelerator fusion neutrons by using the associated particle method[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1998, (00): 1–12
- 7 马鸿昌, 李际周. 加速器单能中子源常用数据手册[M]. 中国原子能科学研究院内部资料, 1976
- 7 MA Hongchang, LI Jizhou. The usual manual of singleness neutron source in accelerator[M]. Internal data in China Institute of Atomic Energy, 1976

Verification of the integral experimental system with standard sample method

ZHANG Kai¹ NIE Yangbo¹ BAO Jie¹ RUAN Xichao¹ REN Jie¹
HAN Rui² HUANG Hanxiong¹ LI Xia¹ ZHOU Zuying¹

¹(Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

²(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Background: Integral experiment is an important means to verify the accuracy of the evaluated nuclear data. The reliability of the experimental system is important for evaluating nuclear data. **Purpose:** In order to check the reliability of the experimental system in China Institute of Atomic Energy (CIAE), the standard sample method was used. **Methods:** The neutron leakage spectra were measured at 47° for polyethylene sample (10 cm×10 cm×5 cm) and at 30° for water sample ($\varnothing$ 10 cm×5 cm). The experimental results (E) have been compared with the calculated ones (C) which have been simulated using MCNP5 code. **Results:** The results showed that the ratios of n-p scattering area (C/E values) were consistent in the uncertainty of 2% for both samples. **Conclusion:** This experiment confirmed that the nuclear data measured by this experimental system was reliable.

Key words Integral experiment, Standard sample method, Time-of-flight (TOF), n-p scatter, C/E values

CLC TL816+.3